

RONY LAPPALAINEN

SÄHKÖ- JA ELEKTRONIKKALAJEJÄT- TEESSÄ OLEVIEŒ MUOVIEŒ KIEŒRÄTYS

Automaatio-, kone- ja materiaalitekniikan tiedekunta kandidaatintyö

Joulukuu 2019

TIIVISTELMÄ

Rony Lappalainen: SÄHKÖ- JA ELEKTRONIIKKALAJEJÄT-TEESSÄ OLEVIER MUOVIER
KIERRÄTYS

Tampereen yliopisto

Kandidaatintyö

Joulukuu 2019

Teknisten tieteiden materiaalitekniikan TkK-tutkinto-ohjelma

Pääaine: Materiaalitekniikka

Tarkastaja: Ilari Jönkkäri

Avainsanat: sähköjäte, elektroniikkajäte, muovit, kierrätys

Sähkö- ja elektroniikkajäte on alati kasvava jätelaji maailmassa. Teknologisoitumisen myötä tämä kasvuvauhti ei tule hidastumaan. Tässä kandidaatintyössä perehdytään kyseiseen jätelajiin tarkemmin ja pohditaan sen kierrätyksen haasteellisuutta etenkin jätteessä olevien muovien osalta. Työssä käsitellään aluksi nykyistä tilannetta ja kuinka sen ennustetaan kehittyvän tulevaisuudessa. Tämän lisäksi käsitellään jätteessä olevia muoveja tarkemmin ja perehdytään olemassa oleviin kierrätysmenetelmiin ja niiden käyttökelpoisuuteen.

Työssä tutustutaan sähkö- ja elektroniikkajätteen kierrätyksen haasteisiin, jotka liittyvät nykyisten kierrätysmenetelmien riittämättömyyteen ja jätteessä olevien muovien palonestokäsittelyihin ja niiden aiheuttamiin ympäristöhaittoihin kierrätyksen yhteydessä. Lisäksi perehdytään niin kutsuttuun mikrotehdas-teknologiaan, joka on todennäköisesti yksi monista tulevaisuuden teknologioista, joilla pyritään vastaamaan muovijätteiden kierrätyksen haasteisiin.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen yliopiston materiaalitekniikan laitokselle. Haluan kiittää erityisesti työni ohjaajaa TkT Ilari Jönkkäriä, jonka ohjeiden ja kannustavan palautteen avulla sain vihdoin vietyä työni loppuun saakka. Tämän lisäksi kiitos kuuluu kavereille, jotka ovat tarpeen vaatiessa tukeneet ja tsempanneet, kun epätoivo työn valmistumisesta on ollut kovimmillaan.

Tampereen Hervannassa 30.10.2019

Rony Lappalainen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SÄHKÖ- JA ELEKTRONIIKKAJÄTE	2
2.1 Nykytilanne	2
2.2 Muovit elektroniikkajätteessä	3
2.2.1 Muovilaadut	4
2.2.2 Palonestoaineet	7
3. NYKYISET KИERRÄTYSMENETELMÄT	8
3.1 Mekaaninen kierrätys	8
3.2 Kemiallinen ja termokemiallinen kierrätys	10
3.3 Energiaksi kierrätys	10
3.3.1 KDV-Menetelmä	11
3.3.2 Haloclean menetelmä	13
4. HAASTEET	14
5. TULEVAISUUDEN RATKAISU: MIKROTEHTAAT	16
6. YHTEENVETO	18
LÄHTEET	20

1. JOHDANTO

Teknologian kehittyessä sähkö- ja elektroniikkalaitteiden osuus kaikesta valmistettavasta tavarasta on kasvanut räjähdysmäisesti. Yhä useampi ihminen vaihtaa esimerkiksi matkapuhelintaan uudempaan noin kahden vuoden välein. Elektroniikkalaitteiden jatkuva kehitys, ja valmistajien välinen kilpailu, ajavat ihmisiä vaihtamaan laitteitaan huomattavasti tiheämmin kuin esimerkiksi ennen 2000-lukua. Tämän kehityksen myötä myös elektroniikkajätteen määrät ovat jatkuvassa kasvussa. Jatkuvasti älykkäämmäksi muuttuvassa maailmassa tämä tulee olemaan yhä isompi ongelma jatkossa.

Sähkö- ja elektroniikkajätteen kasvavat määrät aiheuttavat haasteita kyseisten laitteiden kierrätyksen kannalta. Tähän kategoriaan kuuluvaa jätettä syntyy joka vuosi 3-4% enemmän edellisvuoteen verrattuna ja määrän on ennustettu nousevan 50 miljoonan tonnin vuosittaiseen jätemäärään vuoteen 2021 mennessä [3]. Tämän työn tavoitteena on tutkia kirjallisuuden avulla, millaisia kierrätysmenetelmiä tällä hetkellä käytetään tämän tyyppisen jätteen kierrättämiseen. Lisäksi tarkoitus on tutkia kehitteillä olevien uusien menetelmien potentiaalia vastata jätemäärän jatkuvaan kasvuun. Suurimmat ongelmat sähkö- ja elektroniikkajätteen kierrätyksessä liittyvät niissä käytettyihin muoveihin. Tästä syystä työ keskittyy pääasiassa sähkö- ja elektroniikkajätteestä saatavien muovien mahdollisiin kierrätys- ja jatkokäyttömenetelmiin.

Työn alussa kuvaillaan tarkemmin sähkö- ja elektroniikkajätteen ominaispiirteet ja minäkalainen jäte voidaan luokitella sopivaksi tähän jätelajiin. Lisäksi paneudutaan tämän hetkiseen tilanteeseen ja jätteen rakenteeseen, josta työ ohjataan keskittymään pääasiassa jätteessä oleviin muoveihin. Luvussa 3 käsitellään sähkö- ja elektroniikkajätteelle nykyisin vakiintuneessa käytössä olevat kierrätysmenetelmät. Seuraavaksi käsitellään tarkemmin haasteita, joita sähkö- ja elektroniikkajätteestä saatavien muovien kierrättämisessä on sekä pyritään vastaamaan siihen, miten kierrätystä voidaan tehostaa kehittämällä nykyisiä menetelmiä ja tuomalla uusia menetelmiä niiden tueksi. Lopuksi käsitellään tulevaisuuden näkymiä analysoimalla kehitteillä olevia menetelmiä ja niiden potentiaalia vastata kasvavaan jätemäärään ja kierrätyksen haasteisiin.

2. SÄHKÖ- JA ELEKTRONIIKKAJÄTE

Sähkö- ja elektroniikkajätteellä tarkoitetaan kaikkia sähkö- ja elektroniikkalaitteita, joille ei ole jatkokäyttökohdetta niiden varsinaisen käytön jälkeen [1]. Kyseessä on erittäin laaja skaala erilaisia tuotteita, jotka voidaan jakaa kuuteen eri jätteen keräysryhmään. Nämä kuusi ryhmää ovat: lämmönvaihdin laitteet, näytöt, lamput, suuret laitteet, pienet laitteet ja pienet IT- ja matkapuhelinlaitteet [2]. Ryhmien luokittelu perustuu niihin kuuluvien tuotteiden erilaisiin elinkaari profiileihin. Tuotteiden erilaiset elinkaaret puolestaan vaikuttavat suoraan tuotteista aiheutuvan jätteen määrään, jätteen rahalliseen arvoon sekä mahdollisiin ympäristövaikutuksiin [1]. Kategorioiden välillä on myös eroja jätteen keräämisessä sekä kierrätysmetodeissa, joista kerrotaan tarkemmin luvussa kolme. Tässä luvussa käsitellään sähkö- ja elektroniikkajätteen tilannetta yleisesti sekä perehdytään tarkemmin jätteessä oleviin muoveihin.

2.1 Nykytilanne

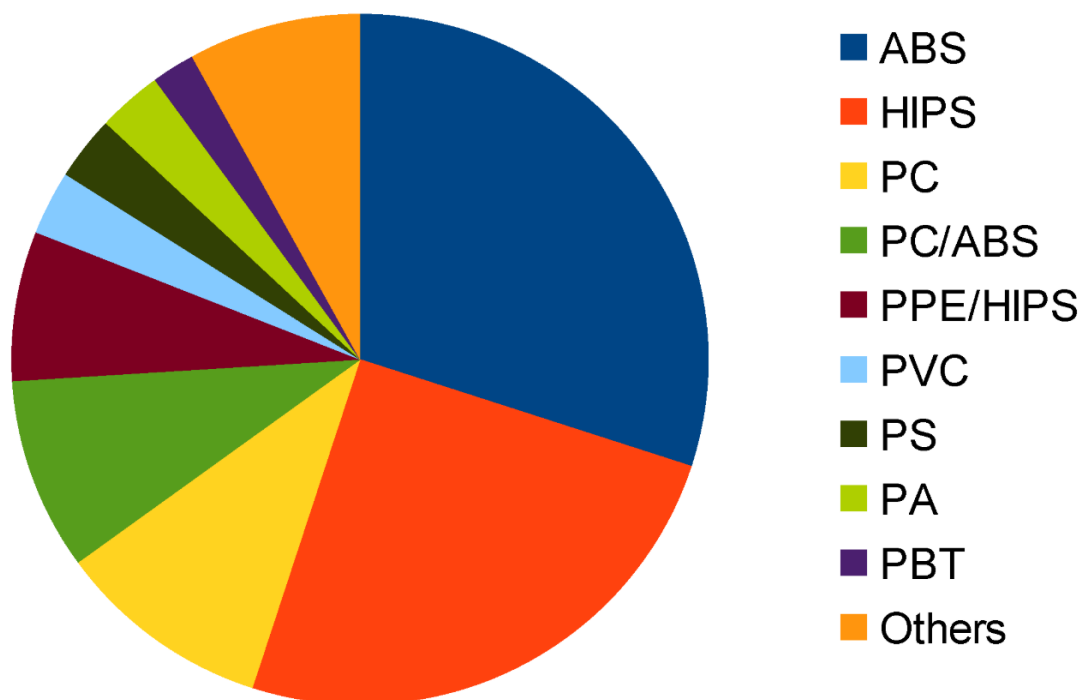
Elektroniikkajäte on nopeimmin kasvava jätelaji maailmassa. Vuosittainen kasvuvauhti on noin 3-4% ja vuosittaisen jätemäärän on ennustettu kasvavan yli 50 miljoonaan tonniin vuoteen 2021 mennessä. Tällä hetkellä vain 15% elektroniikkajätteestä kierrätetään. Suurin syy tähän on nykyisten kierrätysprosessien riittämättömyys ja kierrätyksen haasteellisuus johtuen muun muassa palonestoaineista. Prosessit ja teknologiat eivät pysty vastaamaan jatkuvaan jätteen määrän kasvuun ja elektroniikkajätteen kierrätyksen haastavuuteen. Elektroniikkajätteestä noin 20% on erilaisia muoveja ja usein juuri muovit ovat kierrätyksen esteenä, sillä ne sisältävät usein brominoituja palonestoaineita. [3] Palonestoaineita sisältävien muovien kierrätystä ja uudelleen käyttöä on rajoitettu EU direktiivillä, joka käsittelee sähkö- ja elektroniikkalaitteista aiheutuvan jätteen erittelyä ja lajittelua juuri palonestokäsiteltyjen muovien osalta. Jätteet, jotka sisältävät kyseisiä aineita, tulisi erotella muista sähkö- ja elektroniikkajätteistä. [4]

Sähkö- ja elektroniikkajäte koostuu monista eri materiaaleista kuten metalleista, keraameista, lasista ja muoveista. Mukaan lukien kaikki materiaalit, jätteen rahallisen arvon voidaan laskea olevan noin 55 miljardia vuodessa. Kun huomioidaan, että globaali kierrätysaste elektroniikkajätteelle on kuitenkin vain 15%, saadaan kierrätys toiminnan nykyarvoksi hieman alle 10 miljardia euroa vuonna 2016. Kierrätys toiminta on myöskin

huomattavassa kasvussa ja sen odotetaan saavuttavan noin 13 miljardin euron arvon vuoteen 2021 mennessä. [3]

2.2 Muovit elektroniikkajätteessä

Tässä luvussa keskitytään tarkemmin elektroniikkajätteessä oleviin muoveihin. Kuten aiemmin mainittiin noin 20% sähkö- ja elektroniikkajätteestä on erilaisia muoveja. Muovien määrä ja laatu vaihtelevat sen mukaan millainen laite on kyseessä. Kuvassa 1 on esitetty tyypillisessä elektroniikkajätteessä esiintyvät muovit ja niiden osuudet [7].



Kuva 1. Tyypillisessä elektroniikkajätteessä olevat muovit ja niiden osuudet [7].

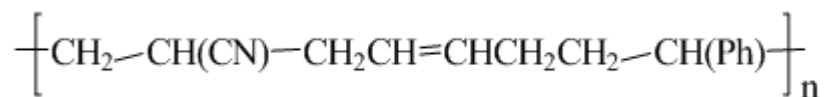
Kuten kuvasta voidaan huomata, ABS (akryyliniiriibutadieenistyreeni) sekä HIPS (High impact Polystyrene) ovat yleisimmät ja eniten käytetyt muovit elektroniikkajätteessä. Myös PC (Polykarbonbaatti) ja näiden edellä mainittujen yhdistelmät ovat yleisesti käytettyjä. Pelkästään erilaisten muovien läsnäolo ei kuitenkaan ole suurin ongelma kierrätystä ajatellen. Ongelma muodostuu palonestokäsittelyistä, joissa muoveja käsitellään esimerkiksi bromilla tai kloorilla (halogenointi), jotta niiden palamiskestävyyttä saadaan parannettua. Käsiteltyjen muovien kierrätystä ja valmistusta säädellessä EU-direktiivillä [4] ja ongelma onkin suurempi vanhempien elektroniikkalaitteiden kierrätyksessä, joissa varsinkin bromipitoisuudet ovat huomattavasti suurempia kuin lähiaikoina valmistetuissa

laitteissa [10]. Seuraavissa alaluvuissa kerrotaan hieman tarkemmin erilaisista muovilaaduista sekä palonestokäsittelyistä, joita sähkö- ja elektroniikkalaitteissa käytetään.

2.2.1 Muovilaadut

Tässä kappaleessa käsitellään tarkemmin sähkö- ja elektroniikkalaitteissa yleisimmin käytettyjä muoveja ja niiden ominaisuuksia. Valitsin käsiteltäviksi muoveiksi määrältään eniten käytetyt muovit sekä niiden lisäksi PVC:n (polyvinyylikloridi) sen kierrätystä hankaloittavien ominaisuuksien vuoksi. Alla mainittujen muovien lisäksi sähkö- ja elektroniikka tuotteissa käytetään kymmeniä muita muoveja, mutta niiden osuudet ovat usein vähäisempiä.

Eniten käytetty muovilaatu sähkö- ja elektroniikkalaitteissa on akryylinitriilibutadieenistyreeni (ABS) [7]. Kyseessä on kestopuovi, joka koostuu yleensä kolmesta komponentista: akryylinitriilistä, butadieenistä ja styreenistä. Akryylinitriinin tehtävänä on tuoda muoville lämmönkestävyyttä, kemikaalikestävyyttä ja lujuutta. Butadieeni parantaa muovin iskulujuutta, kovuutta ja matalan lämpötilan kesto. Styreeni vaikuttaa muovin jäykkyyteen, kiiltoon ja muokattavuuteen. Tyypillinen koostumus sisältää 20% kumia, 25% akryylinitriiliä ja 55% styreeniä.[11] ABS:n kemiallinen rakenne on esitetty kuvassa 2.

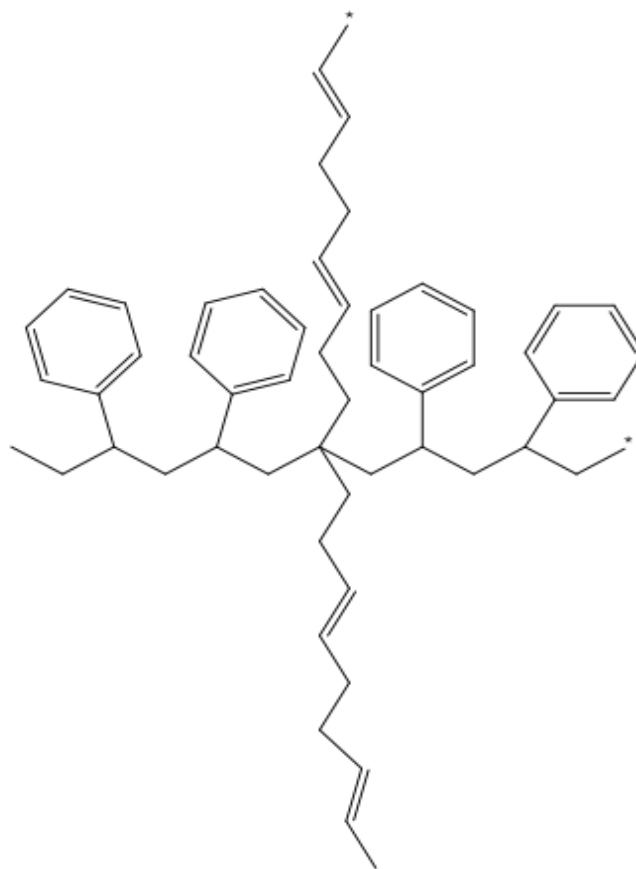


Kuva 2. ABS kemiallinen kaava. [11]

ABS on myydyin korkealaatuinen kestopuovi ja suurin osa tuotetusta muovista käytetään autoteollisuudessa. Toiseksi suurin markkina on sähkö- ja elektroniikka laitteet kuten esimerkiksi imurit, sähkötyökalut ja hiustenkuivaajat.

Toiseksi yleisin puovi, jota käytetään sähkö- ja elektroniikkalaitteissa, on korkean iskun kestävä polystyreeni (HIPS) [7]. Verrattuna normaaliin polystyreeniin HIPS kestää kovempia iskuja, tämän lisäksi sen venymäominaisuudet ja jännityssäröilyn kesto ovat parempia kuin käsittelemättömällä polystyreenillä. Kyseessä on siis kumilla modifioitu polystyreeni. Muovin fyysiset ominaisuudet riippuvat pitkälti siitä millaista kumia muokkaukseen käytetään, styreenin ja butadieenin konsentraatioiden suhteesta sekä prosessiolosuhteista. Käytännössä kyseessä on komposiittimateriaali, joka koostuu kumipartikke-

leista (3-10%) ja polystyreenimatriisista. Kumi on kuitenkin useimmiten liittyneenä polymeerin runkoon, jolloin kyseessä on kopolymeeri, joissain tapauksissa kumi on vain seostuneena polystyreeniin.[10] Kuvassa 3 on esitetty HIPS:n kemiallinen rakenne.

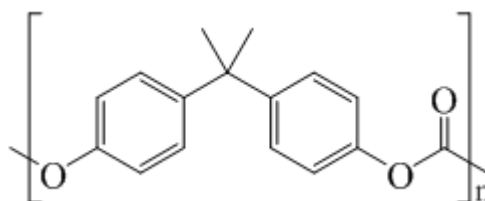


Kuva 3. HIPS rakenne. Polystyreeni ketju, johon liittyneenä molempiin suuntiin haarautuvat polybutadieeniketjut. [12]

Kuvassa oleva polybutadieeni muokattu versio on kaupallisesti tärkein HIPS:n versio. Kumin ristosilloittumisella on suuri vaikutus stabiilin rakenteen aikaansaamiseksi polymerisaation aikana. HIPS:n fyysiset ominaisuudet ovat yhteydessä ristosilloittumistiheyteen. Butadieenin liittyminen polymeerin runkoon on tärkeää sillä se vaikuttaa lopulliseen partikkelikokoon, morfologiaan ja kovuuteen. Suurin markkina HIPS muoville on ruokapakaukset, mutta heti sen jälkeen yleisimpänä tulevat sähkö- ja elektroniikkalaitteet kuten radiot, televisiot ja muut elektroniikkalaitteiden kotelot [10].

Polykarbonaatti ja sen eri variaatiot ovat myöskin suosittuja materiaaleja sähkö- ja elektroniikkalaitteissa [7]. Ominaisuuksiltaan polykarbonaatista saadaan paljon erilaisia versioita uv-kestävistä iskunkestäviin versioihin. Yksi suosituin ja tässä tapauksessa tärkeä

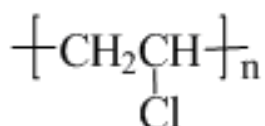
ominaisuus on kuitenkin palonkesto, joka myös useimmiten aiheuttaa hankaluuksia kierrätysvaiheessa. [10] Polykarbonaatin yleinen kemiallinen rakenne on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Polykarbonaatin yleinen kemiallinen rakenne. [10]

Vanhoilla menetelmillä palonestokäsitellyt polykarbonaatit ovat haasteellisia kierrättää, nämä kuitenkin ovat nykyään kiellettyjä ja palonesto-ominaisuuksia saadaan lisäämällä sulojen tapaisia yhdisteitä kuten kloorattuja orgaanisia suoloja tai teflonia. Polykarbonaattia usein myös vahvistetaan esimerkiksi lasi- ja hiilikuiduilla. Pääasiallisena käyttökohteena polykarbonaatteja käytetään sähkölaitteiden eristeinä ja sähkö- ja elektroniikkalaitteiden koteloina ja suojina. [10]

Polyvinyylikloridi (PVC) on erittäin monipuolinen muovi, jota käytetään lähestulkoon kaikkien mihin muoveja ylipäätään voidaan soveltaa. PVC:n kanssa on mahdollista käyttää erittäin monipuolisesti lisäaineita, joiden avulla muoville saadaan kuhunkin käyttötarkoitukseen sopivat ominaisuudet. Tämän lisäksi PVC on helposti muokattavissa oleva materiaali, joten tuotteita voidaan valmistaa monipuolisesti erilaisilla valmistusmenetelmillä. [10] PVC:n yleinen kemiallinen rakenne on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Polyvinyylikarbonaatin yleinen kemiallinen rakenne. [10]

Monipuolisuuden, etenkin hyvän kemiallisen kestävyys ja itsesammuvuuden vuoksi PVC:tä käytetään monipuolisesti lähestulkoon kaikissa muovien käyttökohteissa. Suurin markkina on erilaiset vesi- ja kemikaalisysteemit kuten viemäroinnit. Sähkö- ja elektroniikkalaitteissa etenkin erilaiset kotelot muun muassa televisioille ja tietokoneille ovat suosittuja käyttökohteita. [10]

2.2.2 Palonestoaineet

Teknologian jatkuva kehitys ja tätä myötä elektroniikkalaitteiden yleistymisen ovat johtaneet synteettisten polymeerien käytön valtavaan kasvuun kotitalouksissa ja toimistoissa. Tämä puolestaan on lisännyt tulipaloriskiä huomattavasti ja näin ollen muoveja on alettu suojaamaan palamiselta. Palonestokäsittelyllä tarkoitetaan palavan materiaalin käsitteilyä siten, että materiaalin palaminen hidastuu tai vaikeutuu huomattavasti, se ei kuitenkaan tee materiaalista täysin palamatonta. Käsittelyjä varten on luotu monenlaisia palonestoaineita, joiden avulla voimme suojata erimerkiksi muoveja, nämä palonestoaineet koostuvat yleensä epäorgaanisista aineista kuten: alumiini ja magnesium hydroksideista tai orgaanisista kloorin, fosforin ja bromin johdannaisista. [13]

Lähestulkoon 25% kaikista palonestoaineista sisältää bromia [13]. Tästä tulee useissa yhteyksissä esiintyvä lyhenne BFR (brominated flame retardant), joka siis suomennettuna tarkoittaa bromattua palonestoaainetta [13]. Nämä voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin, jotka ovat lisäaineet, reaktiiviset ja polymeeriset. Näistä ensimmäiset ovat ympäristölle kaikista haitallisimpia, koska niillä on suurempi mahdollisuus irtaantua käytetystä materiaalista ja päätyä luontoon. Kaksi muuta ovat huomattavasti ympäristöystävällisempiä, jos huolehditaan niitä sisältävien materiaalien oikeaoppisesta kierrätyksestä. [13] Tämä siis on huomattava este esimerkiksi sähkö- ja elektroniikkajätettä kierrätettäessä sillä EU-direktiivi [4] säätelee palonestoaineita sisältävien tavaroiden kierrätystä juuri siksi, että väärin kierrätettynä kyseiset palonestoaineet päätyvät luontoon.

Bromin käyttö on yksi halogenoinnin muodoista. Halogenointi on yksi tehokkaimpia palonestokäsittelyjä ja se perustuu toiminnaltaan vapaiden radikaalien vangitsemiseen palamisen aikana. Halogeenit kuten bromi, kloori ja jodi ovat erittäin tehokkaita poistamaan vapaita radikaaleja palamisen aikana, joka puolestaan vähentää palon leviämisen mahdollisuutta. Yleisimmät yhdisteet, joita halogenoinnissa käytetään, ovat orgaanisbromiset ja orgaanisklooriset, koska niiden ominaisuudet kuten korkeampi vapaiden radikaalien poisto ja hajoamislämpötila ovat sopivia muovien palonestotarkoituksiin. Bromioiduista palonestoaineista on olemassa yli 75 erilaista yhdistettä, joita on käytetty tai käytetään palonestoaineina. [14] Halogenoinnin lisäksi palonestokäsittelyt voivat vaikuttaa palamisprosessin muihin vaiheisiin. Esimerkiksi alumiinihydroksidin dehydraatio reaktio yli 200 asteen lämpötilassa on endoterminen reaktio, joka laskee palamisen ja liekin lämpötilaa. [14]

3. NYKYISET KIERRÄTYSMENETELMÄT

Muovien valmistuksen valtavan kasvun vuoksi myös muovista aiheutuvien ympäristöhaittojen vaikutus on ollut lähivuosina erittäin uutisoitu aihe. Tämä puolestaan on johtanut erilaisten kierrätystapojen kehittämiseen. Varsinkin haastavien tuotteiden, kuten sähkö- ja elektroniikkajätteiden, kohdalla kierrättäminen on entistä tärkeämpää. Haastavaksi näiden tuotteiden kierrätyksen tekee niiden sisältämät useat eri muovilaadut, joita käsiteltiin tarkemmin luvussa 2.

Tässä luvussa tarkastellaan muoveille ja etenkin elektroniikkajätteelle olemassa olevia kierrätysmenetelmiä tarkemmin. Lisäksi pohditaan niiden sopivuutta ja riittävyttä vastaamaan elektroniikkajättemäärien jatkuvaan kasvuun. Nämä menetelmät voidaan jakaa neljään kategoriaan, jotka pätevät myös yleisesti polymeerien kierrätykselle [3]. Kyseiset neljä kategoriaa ovat primäärinen, sekundäärinen, tertiäärinen ja kvartäärinen kierrätys [3]. Pääasiallinen haaste polymeerien kierrätyksessä on, että useat polymeerityypit eivät ole yhteensopivia, mikä taas aiheuttaa haasteita kierrätyksessä etenkin lajitteluvaatimuksiin. Nämä yhteensopivuusongelmat voivat olla molekyylitason ongelmia, tai toisaalta ongelmia voivat aiheuttaa erilaiset tarpeet polymeerien prosessoinnissa. [6]

3.1 Mekaaninen kierrätys

Mekaanisella kierrätyksellä tarkoitetaan prosessia, jossa polymeerijätteestä saadaan valmistettua uudelleen tuotteita. Primäärinen kierrätys tapahtuu niin sanotussa suljetussa syklissä. Esimerkkinä tästä on tuotantoprosesseissa syntyvän hukan kierrätys suoraan samaan prosessiin. Sekundäärisellä kierrätyksellä puolestaan tarkoitetaan samaa mekaanista prosessia, mutta valmistettujen tuotteiden ominaisuudet ovat alhaisemmat kuin alkuperäisellä tuotteella. Tuotteen ominaisuuksien aleneminen johtuu kestomuovien kyvystä kestää tietty määrä sulatussyklejä, kunnes polymeeriketjut ovat vaurioituneet ja lyhentyneet niin paljon, ettei tätä prosessia voida enää käyttää niiden kierrättämiseen. Hajoamista tapahtuu jo ensimmäisestä prosessointikerrasta lähtien, mutta muutoksia voidaan huomata vasta vaikutuksen kumuloituessa ja kun hajoamista on tapahtunut merkittävässä määrin. Toinen syy tuotteiden ominaisuuksien huononemiseen on kierrätettävässä materiaalissa olevat epäpuhtaudet, joita se on kerännyt elinkaarensa aikana. [3, 6]

Mekaanisen kierrätyksen prosessi voidaan jakaa viiteen osaan, jotka ovat keräys, puhdistus, lajittelu, koon muokkaus ja valmistus. Prosessi alkaa jätteen keräyksellä, jossa normaali muovijäte usein huolellisesti lajitellaan tai suoraan tuotteista valmistavan yrityksen tuotannosta aiheutuvat hukat huolellisesti otetaan talteen ja lajitellaan. [5] Sähkö- ja elektroniikkajätteen osalta tilanne on hieman monimutkaisempi. Elektronisten laitteiden kierrätyksen yksi hankalimmista vaiheista on jätteen päätyminen kaatopaikoille tai ihmisten kaappeihin sen sijaan, että laitteet kierrätettäisiin. Tämän lisäksi monet elektroniikkalaitteista luokitellaan ongelmajätteeksi, jolloin niiden hävittäminen asianmukaisesti maksaa, mikä puolestaan johtaa laitteiden turhaan säilyttämiseen käyttöään jälkeen tai laitteiden hävittämiseen esimerkiksi normaalin jätteen seassa. Tämän lisäksi tämän tyyppisen jätteen kohdalla muovien erottelu laitteista kustannustehokkaasti on haastavaa.

Seuraava vaihe kierrätyksessä on jätteen puhdistaminen. Tämä vaihe koostuu tuotteiden pesemisestä ja kuivaamisesta, ja se voidaan suorittaa useita kertoja kierrätyksen aikana. Peseminen on tärkeä vaihe, koska sillä saadaan mahdollisia käytön aikana tulleita epäpuhtauksia poistettua tuotteista ennen varsinaista uudelleenkäyttöä. Tämä vaikuttaa suoraan kierrätetyn materiaalin ominaisuuksiin. Pesemistä voidaan tehdä monessa vaiheessa prosessia esimerkiksi, ennen ja jälkeen lajittelun tai jopa lajittelun aikana. [5]

Ensimmäisen pesun jälkeen muovijätteen kokoa aletaan pienentää. Tämä tapahtuu mekaanisesti jauhamalla muovituotteet pienemmiksi partikkeleiksi. Usein tämän vaiheen yhteydessä tai sen jälkeen jätettä pestään lisää, jotta päästään eroon mahdollisista sidosaineista ja muista vielä jäljellä olevista epäpuhtauksista. Tässä kohtaa on hyvä huomata, että etenkin elektroniikasta saatava muovijäte sisältää useita eri muovilaatuja ja sitä on syytä lajitella vielä lisää. Normaalin muovijätteen jauhamisen jälkeinen lajittelu voidaan suorittaa esimerkiksi upottamalla pienet partikkelit veteen. Tämän menetelmän avulla saadaan helposti eroteltua kelluvat polyolefiinit eli polypropeeni ja polyeteenit muista muovilaaduista. Hieman uudempana menetelmänä, joka ei varsinaisesti ole vielä vakiinnuttanut asemaansa, voidaan pitää lasererottelua. Menetelmä käyttää emissiospektroskopiaa, jonka avulla se erottelee muovilaatuja toisistaan. Kyseisen menetelmän selkeä etu on, että se pystyy erottelemaan mustia polymeerilaatuja toisistaan, johon perinteisemmät menetelmät eivät pysty. Tämä menetelmä tulee todennäköisesti yleistymään etenkin sähkö- ja elektroniikkajätteestä saatavien muovien lajittelussa ja kierrätyksessä. [6]

Viimeinen vaihe polymeerien mekaanisessa kierrätyksessä on materiaalin uudelleenkäyttö. Kun kierrätetystä massasta on eroteltu epäpuhtaudet pois ja eri muovilaadut on saatu eroteltua toisistaan, materiaali voidaan ohjata uudelleen erilaisiin sulatusprosesseihin. Primäärisessä kierrätyksessä materiaali voidaan usein ohjata suoraan takaisin samaan prosessiin, josta se on jätteenä kerätty. Sekundäärinen kierrätyksen avulla saadut materiaalit voidaan käyttää joko sellaisenaan uusien tuotteiden valmistamiseen esimerkiksi ruiskuvalu- tai extruusioprosessien avulla. Ekstruusiolla voidaan myös valmistaa pellettejä jatkojalostusta varten. Yksi esimerkki kierrätetyn polymeerin käyttöinnovaatioista on kierrätetyn PET-muovin käyttö kolmikerrospakkausten välikerroksessa, jolla on pystytty vähentämään neitseellisen PET-muovin käyttöä useissa käyttökohteissa jopa 30–50 % ja joissain tapauksissa, kuten tietyissä PET-pulloissa, jopa 100 % materiaalista on kierrätettyä muovia [6].

3.2 Kemiaallinen ja termokemiaallinen kierrätys

Kemiallisella kierrätyksellä tarkoitetaan prosessia, jossa muovien kierrätyksen apuna käytetään kemiallista prosessia. Kemiallisen prosessin seurauksena polymeerisidokset rikkoutuvat ja tuotteena syntyy esimerkiksi monomeerejä tai oligomeerien osia. Kemiallista kierrätystä käytetään pääasiassa korkeampilaatuisten polymeerien kuten polyesteerien ja polyamidien kierrätykseen. Termokemiaallinen kierrätys tapahtuu usein pyrolyysin avulla. Tässä menetelmässä polymeeriä lämmitetään hapettomassa ympäristössä yleensä typen läsnä ollessa. Menetelmällä voidaan tuottaa suuria määriä monomeerejä tai polyolefiinien tapauksessa myös polttoaineen osiksi kelpaavia nesteitä. Pyrolyysi on etenkin sähkö- ja elektroniikkajätteen kierrätykseen erittäin potentiaalinen vaihtoehto, koska sen avulla saadaan talteen monomeerien lisäksi muita jätteessä olevia arvokkaita materiaaleja. Menetelmän suurin haaste on kontrolloida prosessin tuottamia tuotteita. Oikeita katalyyttejä käyttämällä on kuitenkin mahdollista ohjata prosessia tuottamaan haluttuja lopputuotteita. Toinen suuri haaste ovat palonestoaineet, jotka vaikeuttavat prosessia ja ovat myöskin erittäin tarkasti säädeltyjä kierrätyksen osalta. [7]

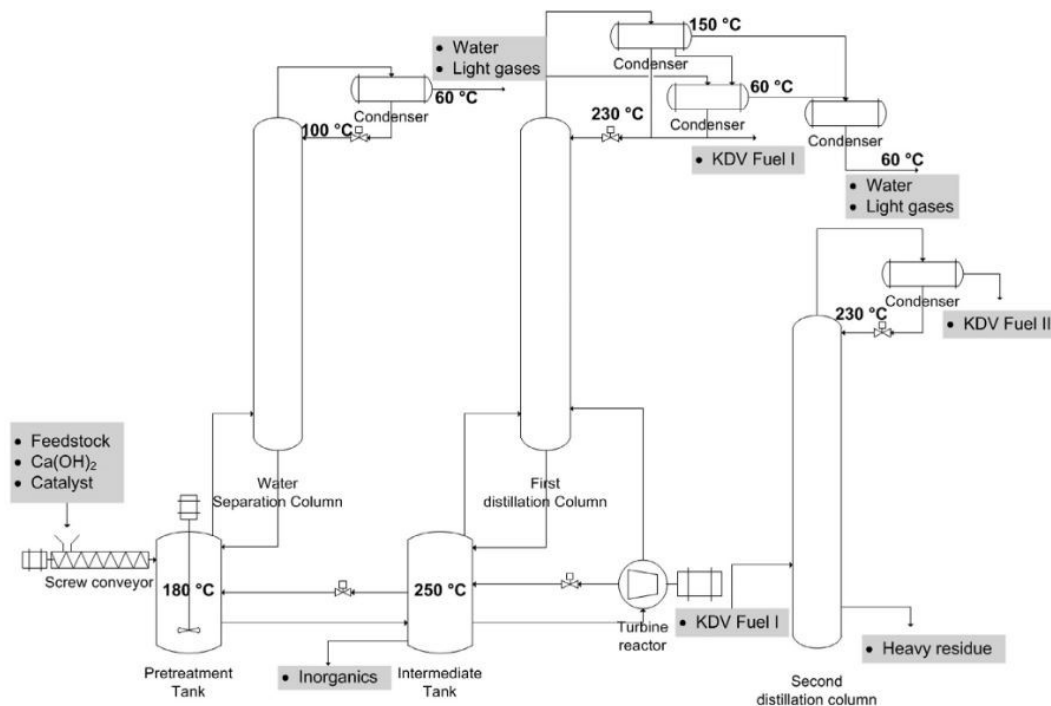
3.3 Energiaksi kierrätys

Normaaleille muoveille energiaksi kierrätykseen on monia hyviä olemassa olevia teknologioita kuten esimerkiksi edellisessä luvussa mainittu pyrolyysi sekä sen lisäksi kaasutus. Näiden normaalien menetelmien käyttö elektroniikkajätteen osalta on kuitenkin usein mahdotonta, koska muovit ovat pääasiassa palonestoaineilla suojattuja, jolloin näitä menetelmiä käyttäessä syntyy vaarallisia yhdisteitä kuten dioksideja. [3, s. 104] Eli normaalista muovijätevirrasta poiketen, kun muuta järkevää kierrätyskeinoa ei löydy,

sähkö- ja elektroniikkajättemuoveja ei voida vain suoraan polttaa energiaksi, vaan on keksittävä muita keinoja, useimmiten jäte päättyy tässä tapauksessa suoraan kaatopaikalle. Muutamia uusia teknologioita on kehitteillä, joiden avulla palonestokäsiteltyjä polymeerejä voitaisiin kierrättää paremmin energiaksi.

3.3.1 KDV-Menetelmä

Ensimmäinen mainittava menetelmä on niin kutusuttu KDV-menetelmä, lyhenne tulee sanoista *Katalytische Drucklose Verölung*, joka tarkoittaa suomennettuna katalyyttistä paineetonta depolymerisointimenetelmää. Kyseessä on saksalaisen Alphakat GmbH yrityksen kehittämä menetelmä, jonka avulla muovijätettä voitaisiin muuntaa nestemäisiin polttoaineisiin sopivaksi lähestulkoon ilmakehän paineessa. Menetelmän etuna on, että sen avulla prosessin tuotteista saadaan lähestulkoon kokonaan poistettua happiatomit, jolloin tuotteena saatavaa nestettä on mahdollista hyödyntää tavanomaisissa polttomoottoreissa. KDV-menetelmän mahdollisina raaka-aineina voidaan käyttää erilaisia muoveja kuten PET ja PP, tai orgaanisia polymeerejä kuten lignoselluloosaa sekä muita orgaanisia ja mineraalipohjaisia yhdisteitä, joissa on hiilivetyjä. Toinen mainittava hyöty kyseisessä menetelmässä on, että menetelmä vaatii huomattavasti matalamman lämpötilan ja paineen kuin vaihtoehtoiset prosessit kuten pyrolyysi, tämän takia vältetään haitallisten kaasujen muodostumiselta prosessin aikana. [8]



Kuva 6. Periaattellinen kuvaus KVD-prosessista [8]

Ylläolevassa prosessikuvaajassa (Kuva 6) on kuvattu KVD-prosessin periaatteellinen toiminta. Ennen kuin prosessia voidaan käyttää, raaka-aineen tulee olla partikkelikooltaan alle 3 millimetriä ja raaka-aineen vesipitoisuuden tulee olla noin viisi painoprosenttia. Tämän jälkeen raaka-aine, kalkki ja katalyytti sekoitetaan kuljettajaöljyyn ja lämmitetään 180 °C asteiseksi. Katalyyttinä prosessissa käytetään kiteistä alumiinisilikaattia. Ja kalkin tarkoitus prosessissa on kontrolloida reaktion pH arvoa ja pitää se noin pH arvossa 9, joka on reaktiolle optimaalinen ympäristö. [8]

Seuraavaksi siirrytään kaaviossa oikealle, ja seos lämpenee 250 °C:seen turbiinireaktorissa. Pyörivä liike kuljettaa esilämmitetyn ja kuivatetun raaka-aineen reaktorin reunalueille ja hiilivedyt erkanevat sen avulla muusta jätteestä. Samaan aikaa sekoittuminen ja kitkaenergia nostavat lämpötilaa ja aiheuttavat depolymerisaation sekä hapen poistumisen irtautuneista hiilivedyistä. Koska reaktio lämpötila pysyy prosessin aikana suhteellisen matalana välillä (230-320 °C) väitetään, että ennen lämmön aiheuttamaa hajoamista muovit halogeeni atominsa ionien reagoidessa katalyytin kanssa. Tämän ansiosta vältetään siis korkeammissa lämpötiloissa tapahtuvan hajoamisen haitallisilta kaasuilta. Nämä edellä mainitut prosessin vaiheet tapahtuvat molemmat hieman alle ilmakehän paineessa (90kPa). [8]

Osa reaktion tuotteista palautetaan sekoittimeen, jotta saadaan aikaan syklinen reaktio, jossa kuljetin öljy kiertää. Prosessissa tarkoituksena on kierrättää sekä polttoaineeksi kelpaava neste että kaasumaiset tuotteet. Tämän vuoksi tarvitaan tislaukset, joissa kaasut ja vesi erotetaan pois kierrosta tislauksen ja lämmönvaihtimien avulla. Myöhemmin KDV-polttoaine tislataan uudelleen eri prosessissa, jossa siitä erotetaan polttoaineeksi sopivat nesteet ja bitumi. Bitumia voidaan hyödyntää esimerkiksi teidenpäällysteenä. [8]

KDV-prosessi on erittäin potentiaalinen menetelmä elektroniikkajätteen kierrätykselle tietyissä tapauksissa, joissa raaka-aine on prosessille sopivaa. On kuitenkin hyvä huomata, että prosessi on vasta alkuasteillaan ja vain muutamia prototyyppi KDV-tehtaita on asennettu vuosien 2004-2012 välillä [8]. Kyseessä on kuitenkin selkeästi yksi potentiaalisimmista ratkaisuista tämän tyyppisen jätteen kierrättämiseen ja se tulee varmasti kehittymään suuremman mittakaavan prosessiksi lähitulevaisuudessa.

3.3.2 Haloclean menetelmä

Haloclean on eurooppalainen projekti, jonka tarkoitus on vastata 2004 vuonna tehtyyn säädökseen sähkö- ja elektroniikkajätteen kierrätyksestä [9]. Säädöksen myötä tarvittiin menetelmä, jolla voitiin käsitellä brominoituja elektroniikkalaitemuoveja [9]. Projektiin osallistui kymmenen toimijaa Euroopan teollisuudesta, yliopistoista ja tutkimuslaitoksista [9]. Tämä on hyvä esimerkki siitä kuinka uudet säädökset vaikuttavat suuresti kierrätysmenetelmien kehittymiseen, koska ne pakottavat yrityksiä ja muita toimijoita kehittämään uusia toimivampia menetelmiä, jotta tuotteita saadaan kierrätettyä tehokkaasti ja turvallisesti ilman ihmiselle tai ympäristölle haitallisia vaikutuksia.

Haloclean on pyrolyysi menetelmä, jonka tarkoituksena on erottaa brominoidut lisäaineet arvokkaammista materiaaleista sähkö- ja elektroniikkajäteesssä. Kyseessä on kaksivaiheinen pyrolyysi, jota on kokeiltu testiolosuhteissa Saksassa. Kaksivaiheinen lämpökemiallinen käsittely on luotu kahden tiiviin ja pyörivän polttouunin avulla. Prosessi on kehitetty siten, että se muuntaa halogenoidut tai bromoidut materiaalit kuten sähkö- ja elektroniikkajätteen polttoaineisiin kelpaaviksi nesteiksi ja jätteiksi jää arvometallit, jotka voidaan myös ottaa talteen prosessista. Prosessin testaus kuitenkin osoitti, että prosessi ei itsessään riitä puhdistamaan saatavaa öljyä tarpeeksi vaan bromipitoisuus säilyy liian korkeana, jotta öljyä voitaisiin suoraan käyttää esimerkiksi metanolisynteessissä, vaan öljy täytyy jatkokäsitellä esimerkiksi polypropyleenillä. [9]

Testien jälkeen menetelmä siis voitiin todeta toimivaksi, mutta kaikki prosessista saatavat tuotteet vaativat jatkokäsittelyä. Tämän vuoksi menetelmä ei ole sähkö- ja elektroniikkajätteen kierrätyksen osalta päätyntä suuremman mittakaavan prosessiksi. Halocleanista tietoa löytyi lisäksi sen verran, että joitain muotoa prosessista käytetään orgaanisten aineiden käsittelyssä, mutta suoraa lisätietoa sen hyödyntämisestä muovien kierrätykseen en onnistunut löytämään.

4. HAASTEET

Tässä kappaleessa käsitellään sähkö- ja elektroniikkajätteen kierrätyksen haasteita. Suurin osa näistä haasteista on tullut esille työn aikaisemmissa kappaleissa, ja tämän kappaleen on tarkoitus koota yhteen haasteiden syyt ja seuraukset. Pääasiallinen syy miksi valitsin työni aiheeksi sähkö- ja elektroniikkalaitteista saatavien muovien kierrätyksen on se, että kyseisen jätelajin kierrätys on tällä hetkellä hyvin matalaa ja samalla maailmassa tuotetaan jatkuvasti enemmän tämän tyyppistä jätettä.

Ensimmäinen haaste ja oikeastaan koko ongelman lähtökohta on, että sähkö- ja elektroniikkajätteestä kierrätetään kaiken kaikkiaan vain noin 15% ja jätettä tuotetaan vuosittain noin 3-4% enemmän edellisvuoteen verrattuna [3]. Jo pelkästään tämä tilasto kertoo sen, että kierrätysaste on erittäin huono ja jätteen määrä on valtavassa kasvussa maapallon teknologisoitumisen myötä. Mikä sitten on syynä näin huonoon kierrätysasteeseen? Vastaus kysymykseen on selkeä. Nykyiset kierrätysmenetelmät eivät pysty vastaamaan kasvavaan jätemäärään ja yhä tiukempi säännöstely koskien esimerkiksi palonestoaineita kaventaa entisestään käytettävissä olevia menetelmiä.

Tästä pääsemme toiseen haasteeseen, joka liittyy ison mittakaavan käytössä oleviin kierrätysmenetelmiin, joista on kerrottu tarkemmin luvussa kolme. Kierrätysmenetelmien osalta haasteet koskevat niiden sopivuutta sähkö- ja elektroniikkajätteen kierrätykseen. Vaikka muoveille ja muille jätteessä oleville materiaaleille on olemassa hyviä kierrätysmenetelmiä, niitä harvoin voidaan suoraan hyödyntää tämän tyyppisen jätteen kierrättämiseen, koska jäte sisältää usein useampia erilaisia muoveja ja niiden lisäksi vielä metalleja ja muita mahdollisia materiaaleja. Nämä ovat eriteltynä tarkemmin luvussa kaksi. Suurimman haasteen näistä materiaaleista kuitenkin aiheuttavat erilaiset muovit.

Kolmantena haasteena onkin juuri jätteessä olevat muovit ja niiden aiheuttamat ongelmat kierrätyksessä. Sähkö- ja elektroniikkalaitteissa käytetään usein montaa eri tyyppiä olevia muoveja sekaisin ja tämän lisäksi käytetään paljon palonestoaineita. Palonestoaineita sisältävien, yleensä bromioitujen muovien, kierrätyksessä on vielä lisähaasteina bromioitujen muovien erottaminen muista muoveista ennen kuin normaaleja kierrätysmenetelmiä voidaan soveltaa käytännössä. Kaikkein suurin haaste jätteen kierrättämi-

sessä ovatkin siis erilaiset muovit ja se, miten ne saadaan eroteltua muista materiaaleista ja kierrätettyä ympäristöystävällisesti ja tarpeeksi edullisesti, jotta jätettä olisi kannattavaa kierrättää.

5. TULEVAISUUDEN RATKAISU: MIKROTEHTAAT

Kuten haasteet kappaleessa ja kierrätysmenetelmien yhteydessä on selvästi tullut esille, nykyiset käytössä olevat menetelmät eivät ole riittäviä sähkö- ja elektroniikkajätteen käsittelylle. Tulevaisuuden teknologiana esille nousee teknologia, jonka avulla tämän tyyppiset jätettä voidaan jalostaa korkeamman arvon tuotteiksi, kyseessä ovat niin kutsutut mikrotehtaat [15]. Mikrotehtaiden tarkoituksena on käyttää muovijätteestä saatavia ominaisuuksia kuten hiilipitoisuutta, ketjurakennetta, mekaanisia ominaisuuksia ja sidominaisuuksia teollisuuden tarpeisiin kuten esimerkiksi teräksen valmistukseen ja komposiittien raaka-aineina. [3]

Mikrotehtaat ovat mahdollinen ratkaisu jatkuvasti kasvavan sähkö- ja elektroniikkajätteen käsittelyyn. Mikrotehtaat ovat toiminnaltaan joustavia, joka mahdollistaa erilaisiin tilanteisiin ja jätemääriin sopivat käyttömahdollisuudet. Mikrotehtas voidaan skaalata erilaisten läpimenovolyymien mukaan sopivaksi erilaisiin kohteisiin. Normaaleihin muovien kierrätysmenetelmiin verrattuna mikrotehtaat erottuvat muista menetelmistä siten että ne jatkojalostavat jätettä arvokkaammiksi tuotteiksi sen sijaan että ne kierrättäisivät muovin uusiksi muovituotteiksi. [3] Tämä teknologia siis mahdollistaa sen, että jätteen kierrätys on myös taloudellisesti kannattavaa, joka omalta osaltaan houkuttelee yrityksiä kehittämään ja panostamaan tämän kaltaiseen teknologiaan.

Erityisen houkutteleva mahdollisuus hyödyntää mikrotehtaita on terästeollisuudella. Terästeollisuudessa on valmiudet erittäin korkeiden lämpötilojen käsittelyille jo valmiiksi. Tämän lisäksi hiili ja vety pitoinen muovijäte on ideaalista teräksen valmistusta ajatellen, sillä molempia näitä alkuaineita voidaan hyödyntää teräksen valmistuksessa. [3] Esimerkkinä tällaisesta toiminnasta toimii ”The Green Steel” teknologia, joka kierrättää esimerkiksi auton renkaita terästeollisuuden avulla, jossa renkaista saatava hiili korvaa osan prosessissa käytetystä hiilestä, ohessa syntyy myös vetyä, jota voidaan myös hyödyntää teräksen valmistukseen. [16] Kyseistä teknologiaa voitaisiin hyvin hyödyntää myös sähkö- ja elektroniikkajätteen kierrättämiseen samalla periaatteella.

Mikrotehtaita on myös kokeiltu ja onnistuttu käyttämään suoraan sähkö- ja elektroniikka-jätteiden kierrätykseen. Esimerkkinä tällaisesta tutkimus, jossa piirilevyjä onnistuttiin kierrättämään mikrotehdas periaatteella eteenpäin superkondensaattorien raaka-aineiksi. Tutkimuksen mukaan piirilevyistä saatiin talteen aktivoitua hiiltä, jota voidaan jatko käyttää superkondensaattoreissa, joiden köytetään energian varastointitarkoituksiin. [17] Tämä on mielestäni hyvä esimerkki siitä, että uusien teknologioiden hyödyntäminen voi parhaimmillaan johtaa jätteen jalostamiseen jopa arvokkaammiksi tuotteiksi, joka taas vahvistaa kierrätyksen kannattavuutta ja houkuttelevuutta.

6. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin sähkö- ja elektroniikkajätteessä olevien muovien kierrätykseen käytettäviä menetelmiä ja niiden riittävyyttä vastaamaan kyseisen jätelajin määrien jatkuvaan kasvuun ja kierrätyksen haasteisiin. Kuten tilastojen perusteella todettiin, sähkö- ja elektroniikkajätteen määrän odotetaan kasvavan noin 3-4% vuosittain ja ennustettu jätteen vuotuinen tuotto vuonna 2021 tulee olemaan yli 50 miljoonaa tonnia. Tämä on erittäin suuri määrä haitallista jätettä, josta tällä hetkellä kierrätetään vain noin 15%. Kierrättämätön jäte päättyy usein kaatopaikoille, jossa sillä voi olla monenlaisia ympäristövaikutuksia.

Sähkö- ja elektroniikkajäte koostuu monista eri materiaaleista, kuten muoveista, metalleista ja lasista. Työssä keskityttiin kuitenkin pääasiassa jätteessä olevien muovien kierrätykseen, koska ne ovat useimmiten kaikista haastavimmat materiaalit kierrättää, ja ne ovat pääasiallinen syy, miksi tämän jätetyypin kierrätysaste on yhä näinkin matala. Sähkö- ja elektroniikkajätteessä voi olla kymmeniä erilaisia muoveja ja niiden yhdisteitä. Eniten käytetyt muovit ovat kuitenkin ABS, HIPS, PC ja PVC. Pelkästään useiden eri muovien käyttö ei sinänsä tee kierrättämisestä hankalaa, vaan suurin tekijä, joka vaikeuttaa jätteen kierrättämistä on muovien palonestokäsittely. Palonestokäsitellyt muovit sisältävät usein bromia, joka aiheuttaa normaaleissa muovien kierrätysmenetelmissä haitallisia yhdisteitä. Tästä syystä bromia sisältävät muovit tulisi eritellä muista muoveista ennen kierrätystä, joka vaikeuttaa huomattavasti jätteen kierrättämistä.

Kierrättämisen haasteiksi tunnistettiin kolme pointtia, jotka olivat olemassa olevien kierrätysmenetelmien riittämättömyys kasvavaan jätemäärään verrattuna, kierrätysmenetelmien sopimattomuus tämän tyyppiselle jätteelle ja kolmantena jätteessä olevien muovien aiheuttamat haasteet. Nämä kaikki nivoutuvat hyvin yhteen ja niistä voidaan päätellä, että tarve toimivammille teknologioille on olemassa. Yhtenä toimivimmista kierrätysmenetelmistä käsitelimme KDV-menetelmää, joka todettiin erittäin potentiaaliseksi vaihtoehdoksi sähkö- ja elektroniikkajätteen kierrätykseen.

Lopuksi käsiteltiin tulevaisuuden teknologiaa, joka on myös osaltaan jo käytössä muun muassa terästeollisuudessa. Mikrotehtaiden avulla erilaisia muovijätteitä voidaan jalostaa korkeampi arvoisiksi tuotteiksi sen sijaan, että niistä tehtäisiin uusia muovituotteita.

Mikrotehtaat ovat erittäin potentiaalinen ja joustava ratkaisu olemassa olevien kierrätysmenetelmien rinnalle, jota hyödyntämällä kierrätysastetta voidaan varmasti korottaa tulevaisuudessa. Tämän tyyppisen jätteen määrä tulee jatkossakin olemaan kasvussa ja on erittäin tärkeää jatkaa erilaisten teknologioiden kehittämistä, jotta jätteestä saatavat resurssit voidaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti.

LÄHTEET

- [1] C.P. Baldé, F. V. V. Gray, R. Kuehr, P. Stegmann, The global e-waste monitor – 2017 United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna (2017)
- [2] Baldé, C. P., Kuehr, R., Blumenthal, K., Gill, S. F., Huisman, J., Kern, M., Micheli, P. and Magpantay, E. (2015a). E-waste statistics: Guidelines on classifications, reporting and indicators. Bonn, Germany, United Nations University, IAS - SCYCLE.
- [3] Veena Sahajwalla, Vaibhav Gaikwad, The present and future of e-waste plastics recycling, Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry Volume 13, 2018. pp.102-107.
- [4] European Commission, Directive 2012/19/EU of the European parliament and of the council on waste electrical and electronic equipment (WEEE) 04.07.2012.
- [5] R. Francis, Recycling of Polymers: Methods, Characterization and Applications, John Wiley & Sons (2016). 6 p.
- [6] J. Hopewell, R. Dvorak, E. Kosior, Plastics recycling: challenges and opportunities, Philosophical transactions of the royal society B, (2009) pp. 2115-2126
- [7] D. Achilias, E. Antonakou, Chemical and Thermochemical Recycling of Polymers from Waste Electrical and Electronic Equipment, 15.07.2015
- [8] K. Ragaert, L. Delva, K. Van Geem, Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste, Waste Manag, 69 (2017), pp. 24-58.
- [9] L. Tange, D. Drohmann, Waste electrical and electronic equipment plastics with brominated flame retardants – from legislation to separate treatment – thermal processes, Polymer Degradation and Stability Volume 88, Issue 1, April 2005, pp. 35-40.
- [10] P. Hennebert, M. Filella, WEEE plastic sorting for bromine essential to enforce EU regulation, Waste management Volume 71, January 2018, pp. 390-399.
- [11] Polymers: A Property Database, saatavilla: <http://poly.chemnetbase.com/faces/polymers/PolymerSearch.xhtml> , viitattu: 26.10.2019.
- [12] Graft polymer, saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/Graft_polymer , viitattu: 26.10.2019.
- [13] E. Eljarrat and D. Barcelo, Brominated Flame Retardants, Vol. 16, 2011 pp. 3-15.
- [14] M. Alaei, P. Arias, A. Sjödin, Å. Bergman, An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, their use patterns in different countries/regions and possible modes of release, Environment International, Volume 29, Issue 6, September 2003, pp. 683-689
- [15] B. Nogrady, The rise of miniature microfactories, BBC 2016, saatavilla: <https://www.bbc.com/future/article/20161117-the-rise-of-miniature-microfactories> , viitattu 30.10.2019.
- [16] V. Sahajwalla, M. Zaharia, I. Mansuri, R. Rajarao, R. Dhunna, F. Nur Yunus, The power of steelmaking-harnessing high-temperature reactions to transform waste into raw material Resources, AIST Howe Memorial Lecture 2013.

- [17] R.R. Rajagopal, L.S. Aravinda, R. Rajarao, B.R. Bhat, V. Sahajwalla, Activated carbon derived from non-metallic printed circuit board waste for supercapacitor application, *Electrochim Acta*, 211, 2016, pp. 488-498.